

反応性イオンビーム堆積によるSi系結晶薄膜の低温成長

著者	山田 宏
号	1127
発行年	1989
URL	http://hdl.handle.net/10097/12076

氏 名	やま だ ひろし 山 田 宏
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 2 年 3 月 14 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 55 年 3 月 東北大学大学院工学研究科金属材料工学専攻 前期 2 年の課程修了
学 位 論 文 題 目	反応性イオンビーム堆積による Si 系結晶薄膜の 低温成長
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 鈴木 謙爾 東北大学教授 古川 吉孝 東北大学教授 平井 敏雄

論 文 内 容 要 旨

3 次元 LSI 等の超微細電子デバイスや高性能ヘテロ接合デバイスを実現する上で、これらに用いられるエピタキシャル膜（エピ膜）や多結晶膜等の結晶薄膜の成長温度を低温化することは重要である。すなわち、低温化により、不純物プロファイルの急峻性の良いデバイスが作製できると共に、高温での不必要な化学反応によって発生する障害を防止できることや、基板に低融点材料が使用できること等の利点がある。

この低温化を実現するため、高い反応活性を有するイオンやラジカルを膜形成物質として用いたり、供給された膜形成物質を光反応により低温で分解する等の試みが数多く行われてきた。しかしながら、例えば Si ホモエピ膜成長の場合、実用的には CVD（chemical vapor deposition）法が主に利用されており、その成長温度は 900℃以上と高温である。このような状況は、SOS（Si on sapphire）膜等の Si ヘテロエピ膜や Si 多結晶膜成長でも同様である。すなわち、前者の場合、CVD 法で 950℃以上、後者の場合、LP-CVD（Low-pressure CVD）法で 650℃以上の高温を要する。このため、前者の場合、基板から不純物拡散や、基板と膜との熱膨張率差に起因する格子欠陥の発生、後者の場合、安価で大面積のデバイスを構築できるガラス等の低融点絶縁性基板の使用が困難等の問題があった。また、従来の低温膜成長法の多くは基板清浄化処理の低温化に関して言及することは少なく、基板清浄化を含めた本当の意味での全結晶薄膜成長の低温化に対する実用的な方法はまだ確立していないのが現状である。

本研究の目的は、前述した様な結晶薄膜の成長を低温で実現できる、実用的で、かつ、適用領域の広い薄膜成長法を開発することにある。特に、現在の電子デバイスで多用されている Si 結晶薄膜の低温成長に重点を置き、800℃以下での高品質エピ膜成長と 600℃以下での高配向性多結晶膜成長を実現することが目標である。最終的には、基板清浄化を含めた全結晶薄膜成長プロセスの低温化を実現することが狙いである。

この様な低温化を実現する上で、基板上へ輸送される膜構成原子の基板表面上での移動性を高め、かつ、その化学的活性を高めることは、膜構成原子を安定な結晶格子点位置へ速やかに移動し、そして下地原子と安定に結合させることができると言う点で有効と考えた。この考えに基づき、膜構成元素を含む反応性ガスをイオン化および励起し、生成したイオン化粒子のエネルギーを低エネルギー域に制御しながら、同時に生成されたラジカルと共に基板上へ輸送する方法（反応性イオンビーム堆積（reactive ion beam deposition（RIBD））法）を開発し、各種結晶薄膜成長の低温化を実現した。さらに、これを発展させた低温基板清浄化法（反応性イオンビーム清浄化（RIBC）法）を開発することによって、結晶薄膜成長の全プロセス温度の低温化を実現した。

本論文は、上記研究成果をまとめたもので、以下の様に要約される。

第 1 章 序 論

低温結晶薄膜成長に関する従来の研究と概要の問題点について述べると共に、本研究の目的と意義を示した。

第 2 章 反応性イオンビーム堆積（RIBD）法

結晶薄膜の低温成長のための方策と、これを実現するために考案した RIBD 法、および、その装置構成と基本特性について述べた。

低温化の方策として、次の様な指針を立てた。

(1) 膜形成物質の基板表面での移動性を向上するため、膜形成物質の一部をイオン化し、そのエネルギーを制御することによって、基板上へ輸送される全膜形成物質の必要とする運動エネルギーを制御する。(2) 膜形成物質の分解性と反応性を高めるため、膜形成物質をイオンやラジカル等の活性粒子の状態にして基板上へ輸送する。(3) 成長雰囲気中の残留不純物の影響を軽減するため、成長室は超高真空中に排気可能とする。

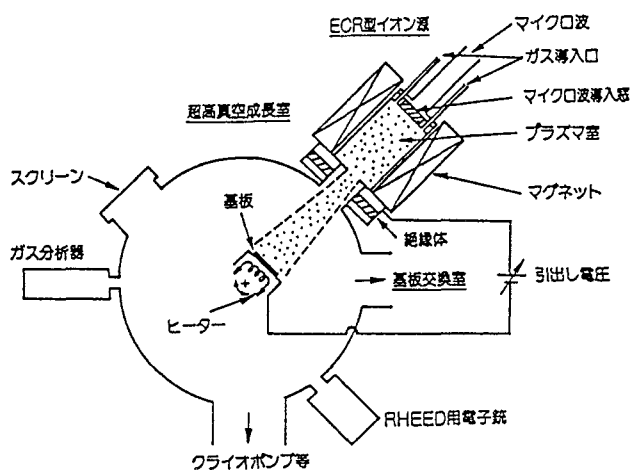


図 1. RIBD 膜形成装置

上記指針を満足させる膜形成装置として、図1に示す装置を開発した。本装置は、電子サイクロトロン共鳴（ECR）型マイクロ波イオン源、超高真空成長室、および基板交換室から構成されている。膜成長は、膜形成物質を含む反応性ガスをプラズマ化し、生成したイオン化粒子とラジカルとを基板上へ輸送することによって行われる。このプラズマ化を効率良く、しかも不純物の発生もなく、そして低ガス圧下でも安定して行うため、ECR励起を採用した。イオンエネルギーは、1000eV以下の低エネルギー域で制御できるようにした。成長室は、 10^{-7} Pa以下の超高真空中に排気可能にし、残留不純物の影響を極力低減した。

第3章 低温ホモエピタキシャル膜成長

Siホモエピ膜成長の低温化と、その高品質化について述べた。また、低温基板清浄化（RIBC）法について詳細すると共に、全膜形成プロセスの低温化の具体例として、RIBC法とRIBD法とを併用した低温パターンドSiホモエピ膜成長について述べた。イオンエネルギーを250～300eVに制御することにより、400℃の低温でエピ成長が可能であった。しかも、多結晶膜成長も200℃の低温で可能であった。この様に、イオンエネルギーを適切に制御することによって、成長温度を著しく低下できることが明らかになり、本方法が結晶薄膜成長の低温化に有効であることが実証された。

低温Siホモエピ膜の高品質化を目的に、超表面構造（高い結晶性と清浄性を有した単結晶表面に認められる原子配列である）を呈するエピ膜の低温成長を検討した結果、Si(111)－ 7×7 およびSi(100)－two-domain－ 2×1 超表面構造を呈したエピ膜成長が、各々、650℃、600℃の低温で可能なことを明らかにした。また、 H_2 －SiH₄プラズマから引き出した還元性の強い活性粒子を用いた基板清浄化（RIBC）法の開発により、超表面構造を呈するSi超清浄表面を650℃の低温で実現した。そこで、このRIBC法とRIBD法の併用によって、基板清浄化を含めた全膜形成プロセスの低温化が可能なことを実証するため、全工程700℃以下の低温でのパターンドSiホモエピ膜成長（Siホモエピ膜/SiとSi多結晶膜/SiO₂の同時成長）を検討し、良好な膜成長が実現できることを明らかにした。

第4章 低温ヘテロエピタキシャル膜成長

高速動作が期待できるSOS（Si on sapphire）ヘテロエピ膜と、耐環境性青色発光半導体である3C-SiC単結晶膜のSi基板上へのヘテロエピ成長を例に、これらの薄膜の800℃以下での低温成長について述べた。

SOSヘテロエピ膜成長に関しては、加工が容易な膜厚（約300nm以下）での膜形成を目指した。その結果、イオンエネルギーを300eVに制御することにより、600℃の低温でエピ成長が可能なことを明らかにすると共に、膜成長段階に応じてイオンエネルギーを2段階に制御する成長法を考案することにより、200nmと言う薄い膜厚にもかかわらず、表面層にマイクロ双晶のない高品質SOS薄膜を600℃の低温で実現した。

一方、3C-SiC/Siヘテロエピ膜成長に関しては、イオンエネルギーを200eVにすることにより、

約 700℃の低温で化学量論的組成を満足する 3C-SiC 膜の成長が可能になることを明らかにした。さらに、結晶性を向上する上で、成長初期に薄い Si ホモエピ層と、膜厚に応じて組成を変化させた Si-C ヘテロエピ層（遷移層）とを設けることが有効なことを見出し、比較的結晶性の良い膜を先と同温の約 770℃の低温で実現した。このことから、RIBD 法が、多成分系の化合物エピ膜の低温成長に対しても有効な技術であることの確証が得られた。

第 5 章 低温多結晶膜成長

デバイス構成上有意義な絶縁性非晶質基板上への Si 多結晶膜の低温成長と、高い電気特性を有した高配向性 Si 多結晶膜の低温成長について詳述した。また、イオン照射による Si 非晶質薄膜の結晶化温度の低温化と、これを下地基板に用いた高配向性 Si 多結晶膜の低温成長について述べた。

絶縁性非晶質基板上への Si 多結晶膜成長も約 250℃の低温で可能であった。また、成長温度を 550℃以上にし、イオンエネルギーを約 100eV 近傍に制御することにより、基板表面に平行に Si (220) 面が強く配向した多結晶膜が得られることを明らかにした。特に、この高配向性膜では、電気特性に悪影響を及ぼす Si ダングリングボンドが H 原子により不活性化されているため、優れた電気特性を呈し、実用レベルの特性を有することが実証された。さらに、配向性をより向上するため、基板上へ薄い結晶化 Si 非晶質薄膜を形成した後多結晶膜を成長する方法を検討した。その結果、水素イオンの照射により Si 非晶質薄膜の結晶化を 400℃の低温で可能にすると共に、この結晶化非晶質薄膜を下地基板として 550℃で成長させた Si 多結晶膜が、さらに強い配向性と優れた電気特性とを有していることを明らかにした。

第 6 章 考察および総括

今後検討すべき課題に重点を置いて全体的な考察を行った。また、本論文の結論として、第 5 章までの研究結果の総括を行った。

審 査 結 果 の 要 旨

高機能超微細電子デバイスを実現するには、Si 単結晶薄膜成長の低温化は極めて重要な課題である。本論文は、基板洗浄を含む全プロセスの低温化を ECR 励起プラズマを用いる反応性イオンビーム堆積法により達成した技術開発の基礎的成果を取りまとめたもので、全編 6 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、シランガスを原料とする場合の Si 単結晶薄膜の低温成長のための方策を検討し、基板上へ輸送される膜形成物質の運動エネルギー、化学反応性などの諸因子を効果的に制御するため、電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 型マイクロ波イオン源並びに超高真空膜成長室を採用した経過を述べている。

第 3 章では、超表面構造を有する高品質 Si 膜成長の低温化並びに得られた膜に品質制御に直結する低温基板清浄化法の開発について述べている。さらに、全膜形成プロセスの低温化の具体例として、パターンド Si ホモエピ膜成長の実験結果を詳細に紹介している。

第 4 章では、高速動作用 SOS (Si on Sapphire) ヘテロエピ膜並びに耐環境青色発光半導体である 3C-SiC 単結晶膜の Si 基板上へのヘテロエピ成長に関する結果を述べている。特に、イオンエネルギーを 200~300eV の間で膜成長段階に応じて二段階に制御することにより、600℃の低温で表面マイクロ双晶のない高品質 SOS 膜の成長に成功したことは貴重な知見である。さらに、約 770℃の低温で化学量論的組成を満足する 3C-SiC 単結晶膜の成長が可能であることを確認している。

第 5 章では、非晶質絶縁体基板上へ高配向性 Si 多結晶膜を低温成長させた実験結果を述べている。本方法を用いると、250℃の低温でも Si 多結晶膜の成長が可能であるが、成長温度を 550℃まで上昇させることにより基板表面に平行に Si (200) 面が強く配向した多結晶 Si 膜が得られることを明らかにした。

第 6 章は総括である。

以上要するに本論文は、Si 系単結晶並びに配向性多結晶薄膜の成長を基板洗浄をも含む全プロセスとして大幅に低温化することを目的として、反応性イオンビーム堆積法を基本におく新しい技術開発を行なったもので、材料物性学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。